第38卷 第5期
2021年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

2014—2018年青海省云水资源时空分布特征

张玉欣， 马学谦， 韩辉邦， 张鹏亮， 刘 娜
（青海省人工影响天气办公室，青海 西宁 810000）

摘 要： 利用水平分辨率为0.25°×0.25°的ERA5小时再分析资料，采用CWR-MEM方法和EOF方法对2014—2018年青海省降水、水汽、水凝物及空中云水资源进行分析。结果表明：青海省年降水分布呈东南多、西北少阶梯性递减特征，空间分布极不均匀。水汽分布带主要为北部的柴达木—青海湖—河湟谷地分布带、西南部的可可西里—治多—杂多分布带和东南部的巴颜喀拉山—黄河河曲地区分布带；水凝物和降水分布特征类似，呈东南多西北少的分布格局，在山脉迎风坡相对偏多。水汽主要从南、西南和西北边界输入，水凝物主要从澜沧江和长江源区的西部和南部输入，全省平均水汽和水凝物降水效率分别为0.3%和14%；总云水资源708×10^8 t，在三江源地区南部及东南部最为丰沛，最高达2000 kg·m^{-2}，祁连山南麓至西宁延伸带的云水资源为次高区，柴达木盆地云水资源总量相对较低。云水资源EOF分解中主要空间分布呈现东北多西南少的阶梯式变化。依据水汽、水凝物输送及云水资源分布特征结合不同区域、不同地形开展有针对性的人工影响天气作业十分必要。

关键词： 云水资源；水汽输送；降水效率；EOF分析

云系中凝结未形成降水的部分称为云水，利用一定科学手段人工施加影响使其人为的降到地面，能被人们所利用的云水称为云水资源[1]。自然云的降水效率并不高，如何提高云降水效率、科学合理开发云水资源是人工影响天气的一个重要问题，是解决区域干旱和维护良性生态环境的主要途径，而研究水汽分布、降水分布、大气可降水量、降水效率等云水资源相关物理量是合理开发云水资源的重要前提。从20世纪90年代国内外学者利用多种手段对大气中的水汽分布、输送特征等问题的研究[2-5]。李兴宇等[4]对云水路径（CWP）的分布研究中认为，CWP与大气环流、地形和大气湿度的分布密切相关，并且存在明显的季节变化。杨大生等[3]研究中国夏季云液水含量结果表明高原地形和东亚季风对全国云含水量分布有明显影响。研究云水含量对评估云水资源开发潜力提供科学依据，也可为减少气候模式中云模拟中的不确定性提供参考。

我国的西北地区属于干旱、半干旱区，水资源短缺是制约其社会和经济发展的关键因素之一，如何有效开发空中云水资源一直备受广泛关注[6-11]。研究普遍认为西北地区水汽输送主要受到西南风及西风水汽输送，纬向西风水汽输送在全年水汽输送中占主要地位[6-8]，受到地形等多种因素影响降水和水汽分布的不均匀，导致大气可降水量分布极不均匀[9-10]。近年来再分析资料的时空分辨率更高更精细，利用再分析资料对云水资料等相关问题的研究显著增加。刘菊菊等[11]利用ERA-Interim再分析资料分析了1979—2016年青藏高原夏季云水含量及其水汽输送情况，全年高原夏季云水含量占比最高，呈现东南向西北减少的趋势，最主要影响高原云水含量的水汽通道有印度洋通道和南海通道。王凯等[12]利用ECMWF和NCEP/NCAR研究西北地区水汽含量，认为西北地区水汽源主要位于新疆天山山脉、青海中东部、甘肃河西走廊中西段等地区，而水汽汇则位于甘肃南部和陕西南部。研究长时间序列的水汽、云和降水的分布及变化特征对长期甚至气候尺度的空中云水分析十分重要。

青海省是我国西北地区重要生态功能区，东部

收稿日期： 2020-12-09； **修订日期：** 2021-02-01
基金项目： 国家自然科学基金项目（41665008，41705121），国家重点研发计划（2019YFC1510302），青海省自然科学基金（2017-ZJ-944Q），青海省气象局重点项目（QXZ2020-06）共同资助
作者简介： 张玉欣（1993-），女，硕士，主要研究方向为大气环境、大气物理. E-mail: nuistzyx@126.com
通讯作者： 马学谦. E-mail: moblflyqxm@126.com

有祁连山、青海湖,南有长江、黄河和澜沧江的发源地——三江源,西北有可可西里自然保护区,研究该地区水汽输送、水凝物总量、水汽和水凝物更新周期、水凝物转化效率,评估云水资源精细时空分布特征,将为科学指导人工增雨(雪)作业、提升保障服务水平、推进科技创新提供重要的科技支撑。因此,本文利用水平分辨率0.25°×0.25°的ERA5小时再分析资料,结合地面降水观测资料,对2014—2018年青海省空中云水资源进行逐小时格点评估,将为青海省开发云水资源提供重要、精准、科学的作业客观依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

青海省地理位置位于31.50°N~39.25°N,89.50°E~103.00°E,在"世界屋脊"青藏高原东北部,总面积约为72×10^4 km^2,总体地势呈西高东低,南北高中部低的态势,东部地区为青藏高原向黄土高原过渡地带(图1)。东部北部有祁连山、青海南山、托来南山等山脉,西北部分布有中国三大内陆盆地之一的柴达木盆地,南部有黄河、长江和澜沧江的发源地"三江源"地区。青海省兼具青藏高原、内陆干旱盆地和黄土高原3种地形地貌,属高原大陆性气候。

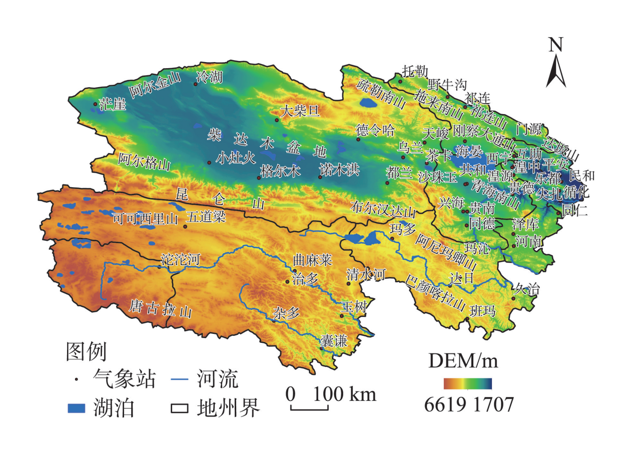


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area.

1.2 研究方法

利用水平分辨率0.25°×0.25°的ERA5小时再分析资料,采用云水资源监测方法(CWR-MEM)对2014—2018年青海省空中云水资源进行逐小时格点分析。2019年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)推出其第五代再分析产品(ERA5),资料从1950年开始至今,时空分辨率为31 km和1 h,垂直方向上为从地面0.01 hPa的137层。

研究空中云水资源所涉及的物理量主要包括:水汽总量、水凝物总量、水汽凝结效率、水凝物降水效率、总水物质降水效率、水汽和水凝物更新周期、空中云水资源总量等。云水资源监测评估详细方法参考文献[13]。水汽含量的计算方法如下式:

$$W = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{P_z} q\mathrm{d}p \qquad (1)$$

式中:W表示水汽含量(g·cm^{-2});g表示重力加速度(m·s^{-2});q表示各层比湿(g·kg^{-1});P_z表示大气1000 hPa处的气压值(hPa);P_s表示地表面气压(hPa)。

水汽输送通量表示单位时间流经某一单位面积的水汽质量,反映水汽的输送强度。水汽输送通量的计算公式如下:

$$Q = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{P_z} V_n q\mathrm{d}q \qquad (2)$$

式中:Q表示水汽输送通量(g·s^{-1}·cm^{-1}),V_n表示与区域边界垂直的风速分量(m·s^{-1}),本文中所用到的其他物理量计算方法如表1所示。

采用经验正交分解(Empirical Orthogonal Function,EOF)分析云水资源的时空分布特征。EOF又称为主成分分析(Principal Component Analysis,PCA),最早由Pearson提出[14-15],其中空间模态在一定程度上可反映要素场的空间分布特点,PC为对应的时间系数(即主成分)则反映相应空间模态随时间的权重变化。

2 结果与分析

2.1 云水资源及相关物理量时空分布特征

青海省年均降水量的分布特征如图2所示,全省降水分布呈东南多、西北少的阶梯性递减特征。其中,三江源地区年降水量接近550 mm,局地超过600 mm;祁连山地区降水整体向西递增,祁连山南麓的祁连和门源年均降水量接近450 mm,大通山、疏勒南山、达坂山超过500 mm。柴达木盆地四周高山环绕,年降水不足50 mm。青海省东北部地区平均降水在450~500 mm。青海省降水空间分布极不均匀[16],降水不随海拔高度增加,青藏高原降水的海拔梯度效应受到复杂的地形和水汽来源的共同作用[17]。

从2014—2018年青海省年均单位面积垂直气柱中水汽和水凝物的分布特征可知(图3a,图3b),

表1 云水资源总量及其各种物理量的物理概念和计算方法

Tab. 1 The physical concept and calculation method of total cloud water resources and its physical quantities

物理量	意义	方法
水汽总量	区域内参与大气水循环过程的所有水汽的收入量	格点柱垂直积分水汽量+水汽输出+凝结
水凝物总量	区域内参与大气水循环过程的所有水凝物的收入量	格点柱垂直积分水凝物量+水凝物输入+凝结
降水总量	*T*时段内,分析区域的降水总量	*T*时段内区域雨量的累加
云水资源总量	一定范围,一段时间中水凝物总量中没有降到地面的部分	水凝物初值+水凝物总输入+凝结-降水
水汽更新周期	区域内水汽瞬时总量的平均值和平均降水强度的比值	水汽瞬时总量的平均值/(总降水量/时段)
水凝物更新周期	区域内水凝物瞬时总量和平均降水强度的比值	水凝物瞬时总量的平均值/(总降水量/时段)
水汽凝结效率	一定范围,一段时间中总凝结量占水汽总量的比率	总凝结量/水汽总量
水汽降水效率	一定范围,一段时间中降水总量占水汽总量的比率	降水总量/水汽总量
水凝物降水效率	一定范围,一段时间中降水总量占水凝物总量的比率	降水总量/水凝物总量

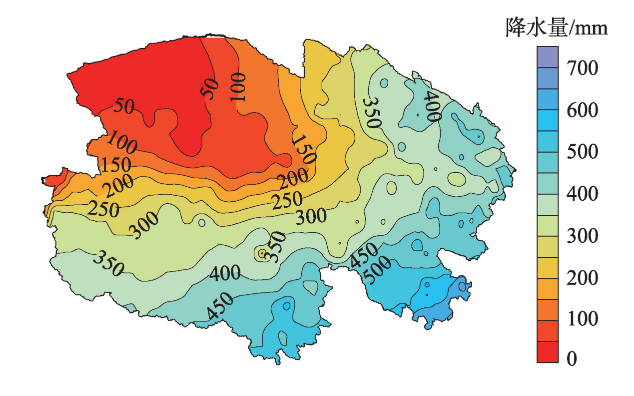


图2 2014—2018年青海省平均降水量分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of average precipitation in Qinghai Province from 2014 to 2018

水汽分布与降水差异较大,水汽分布主要呈3条带状分布,分别为北部的柴达木—青海湖—河湟谷地分布带、西南部的可可西里—治多—杂多分布带和东南部的巴颜喀拉山—黄河河曲地区分布带,单位面积年均水汽总量的最大值位于青海湖流域,最小值位于柴达木盆地北缘、昆仑山及祁连山山区,结合图1可知,水汽输送带和地形显著相关。由于青海全年主要受到偏西气流和偏东气流控制,北部的柴达木—青海湖—河湟谷地水汽分布带上水汽从阿尔金山北部进入后沿柴达木盆地经过青海湖和青海南山到达东部的河湟谷地,同时,东部在夏季也受到偏南风的影响及青海湖自身地形的影响,青海湖上水汽呈现明显较高特征。三江源地区水汽带主要为西南部的可可西里—治多—杂多分布带和东南部的巴颜喀拉山—黄河河曲地区分布带,在青藏高原热力作用下,该地区切变和低涡偏多,西南气流在东亚和印度洋季风的驱动下进入该地区。李生辰等[18]研究表明,东亚和印度洋季风的强弱变化将影响三江源区的降水。同时在夏季副高边缘加强时所携带的南海水汽也影响该地区[5]。祁连山南麓西部没有高大山脉的阻挡,全面受到西风带的影响,而西风气流携带水汽较少[19],所以祁连山水汽含量也较小。

水凝物和降水的分布特征类似,呈东南多、西北少,大通山、疏勒南山、达坂山、青海南山、拉脊山、阿尼玛卿山等山脉迎风坡相对偏多。与水汽相比,2014—2018年单位面积年平均水凝物总量比年均水汽总量低1~2个量级,且空间分布极不均匀。单位面积年均水凝物总量的最大值位于三江源久治—班玛一带,最小值位于茫崖—冷湖一带。与水汽分布特征明显不同的是北部的柴达木—青海湖—河湟谷地水汽分布带上水凝物并没有出现较高值区域,反而是青海省的水凝物最低区域,这主要有两个原因,一是柴达木盆地周边高山环绕,气流到达该区域后下沉作用明显,没有较好的上升气流条件。二是柴达木盆地地面沙质的小气溶胶较多,主要为盐碱成分在有较好的水汽条件时更容易产生"争食"水汽的情况,使得水凝无法有效的增长。在祁连山南麓虽然水汽较少,但是水汽到达该地区受到地形作用,水汽抬升作用明显更易凝结。

由青海省年平均单位面积垂直气柱中水汽和水凝物的输送通量分布特征可知(图3e,图3f),全省水汽和水凝物输送通量分布特征有一定的差异。西北部地区水汽和水凝物的输送通量差异较大,水汽表现为输入量大于输出量,而水凝物表现为输入量与输出量相等,水凝物的年输入量明显小于水汽量1~2个量级。水汽输送通量的输入量最大值主要位于三江源地区的南部、柴达木盆地的西北部,而水凝物输送通量的输入量最大值位于三江源

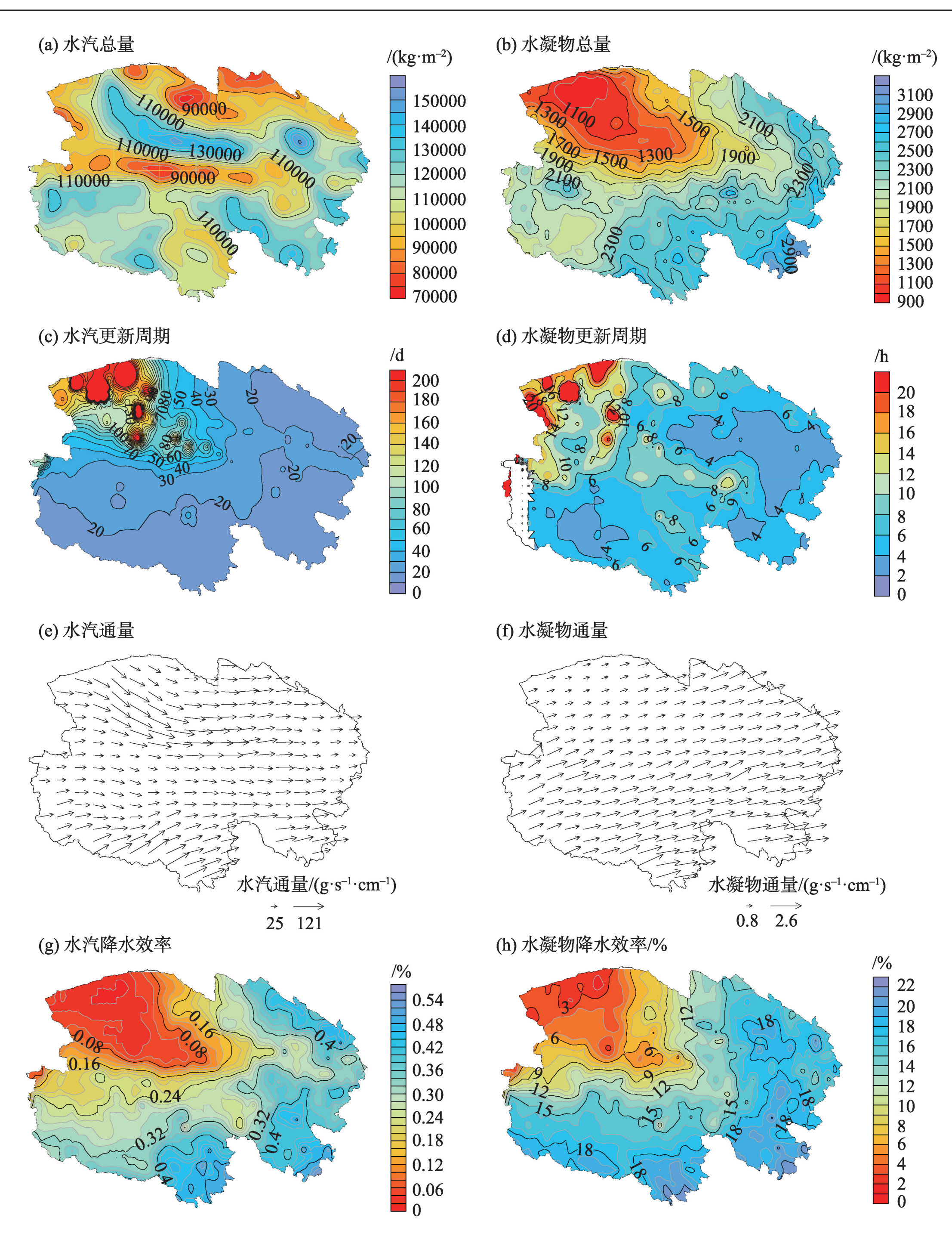


图3 2014—2018年青海省水汽和水凝物总量、更新周期、通量和降水效率的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of atmospheric water vapor and relevant physical quantities in Qinghai Province from 2014 to 2018

南部，输出量的最大值位于祁连山山区、东部农业区和三江源东部地区。单位面积垂直气柱中水汽输送通量最高为1200 g·s^{-1}·cm^{-1}，水凝物输送通量最高为30 g·s^{-1}·cm^{-1}。

由青海省年平均水汽和水凝物更新周期的分布特征可知（图3c，图3d），除柴达木盆地中部和西北部外，全省不同地区的水汽更新周期年平均值大多在40 d，柴达木盆地水汽循环最慢，可达200 d。水凝物的更新速度明显快于水汽，不同地区差异明显，总体表现为水凝物输送丰沛和水汽易于堆积的迎风坡更新较快，盆地或平坦地区更新较慢。水凝物更新周期最快地区（东部农业区和青海湖流域）约4 h，其他区域水凝物更新周期约5~6 h，柴达木盆地的西北部水凝物更新最为缓慢，约8~14 h，局部地

区超过20 h。从青海省年平均水汽和水凝物降水效率的分布特征可知(图3g,图3h)。青海省平均水汽和水凝物降水效率分别为0.3%和14%,其两者分布大体近似以西高东低分布,水汽凝结效率在柴达木盆地最低(0.2%),而长江和澜沧江源区最高(0.5%),三江源地区水汽凝结效率也相对较高。

总体而言,水汽和水凝物空间分布不均,水汽总量分布主要呈3条带状分布,而其他物理量呈现不均匀的西南向东北逐渐增加趋势,柴达木盆地普遍偏低,黄河上游地区偏高。结合图3中的参量分析典型地区的特征而言:青海湖地区水汽总量、水汽更新周期相对周边区域明显偏高而水汽降水效率不高,水凝物降水效率偏高。有研究表明,青海湖降水明显受湖陆热力性质差异的影响,降水主要由夜间的暖湖效应使湖面产生辐合上升气流,促进对流的发展和水汽的扩散[20],青海湖地区降水主要依赖水凝物降水。祁连山南麓地区降水总量和水凝物总量较高而水汽总量偏少,作为高原夏季风的向风面在地形抬升作用下水汽和水凝物的更新周期、降水效率也明显偏高。澜沧江和长江源区在水汽和水凝物的总量、更新周期及降水效率均呈现较高值,降水量也较高。

青海省年均单位面积垂直气柱中云水资源量在708×10^8 t左右(图4),三江源地区的南部及东南部最为丰沛,其中杂多、治多、曲麻莱、玉树、清水河及玛多的西南部一带较高,久治和班玛最高,最高达2000 kg·m^{-2},祁连山南麓的门源、祁连、大通山和达坂山、西宁等延伸带的云水资源为次高区,柴达木盆地云水资源总量相对较低,最低为900 kg·m^{-2}。云水资源的空间分布极不均匀。相对全国云水资源总量来说西北区域水凝物总量分布最少,降水效

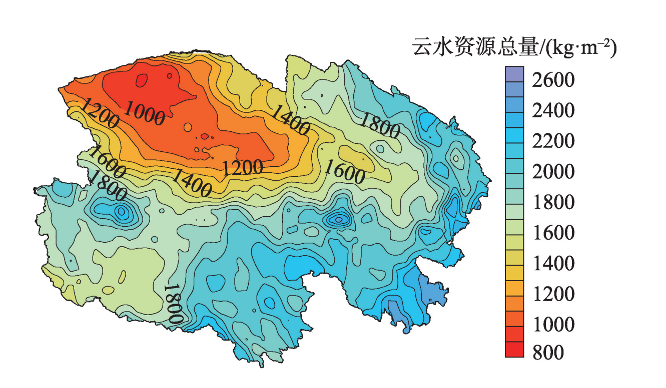


图4 2014—2018年青海省年均云水资源分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of average cloud water resources in Qinghai Province from 2014 to 2018

率较低[13],但平均水凝物更新周期和降水效率在青海东部有明显上升的趋势[11],这与本研究结论相似。

通过分析云水资源总量与各物理量的相关性发现(图5),云水资源总量与水凝物总量、降水总量及水汽降水效率的相关性较高,分别为0.97、0.74和0.71,说明水汽降水效率及水凝物总量较高的地区云水资源总量更高,在降水较高的地区云水资源可开发的量更高。云水资源总量与水汽和水凝物更新周期没有明显的线性关系,但云水资源总量大于2000 kg·m^{-2}的水汽更新周期均小于40 d,水凝物更新周期平均小于10 h。对于东部农业区、祁连山区和三江源地区相对青海其他地区有较高水汽和水凝物的降水效率,平均分别为0.4%和18%,但仍有较高云水资源量可供开发。

2.2 云水资源总量季节特征

从季节尺度分析云水资源(图6),春季(3—5月)三江源地区西部单位面积云水资源总量较高,达210 kg·m^{-2},祁连山山区中东段及东部农业区的山谷迎风坡云水总量也较高,柴达木盆地西北部较低为90 kg·m^{-2}。云水资源总量随时间明显增加,祁连山山区中东段增加明显,黄河源区东南部和西北部也显著增加,澜沧江和长江源区云水总量高值区主体向东北偏北方向移动,受昆仑山和布尔汗布达山阻挡,向东延伸至黄河源区西北部。

夏季(6—8月),祁连山地区、青海湖流域、东部农业区云水总量显著增加,特别是祁连山西端最高,达330 kg·m^{-2},可可西里西部也显著增加,最高达240 kg·m^{-2}。澜沧江和长江源区、巴颜喀拉山、黄河上游地区6月最高,达320 kg·m^{-2},之后显著降低,7月仅为150 kg·m^{-2},8月回升至230 kg·m^{-2}。其他区域增加不明显。

秋季(9—11月)9月是全年云水资源总量最高且分布最广的月份,达360 kg·m^{-2}。高值区主要分布在三江源地区及其祁连山中东段,可可西里西部、东部农业区山脉的迎风坡也较高,特别是黄河源区的东部单位面积云水总量最高。祁连山地区、可可西里与澜沧江和长江源接壤处云水总量最高值随时间显著降低,且面积缩小,11月仅澜沧江和长江源区东南部、巴颜喀拉山及黄河源区西部云水总量最高,达150 kg·m^{-2},其他区域显著减少。

冬季(12月至次年2月)分布特征与秋季接近,最高值有所降低,至次年1月云水总量最高值为全年最低仅110 kg·m^{-2},三江源地区西部以及柴达木

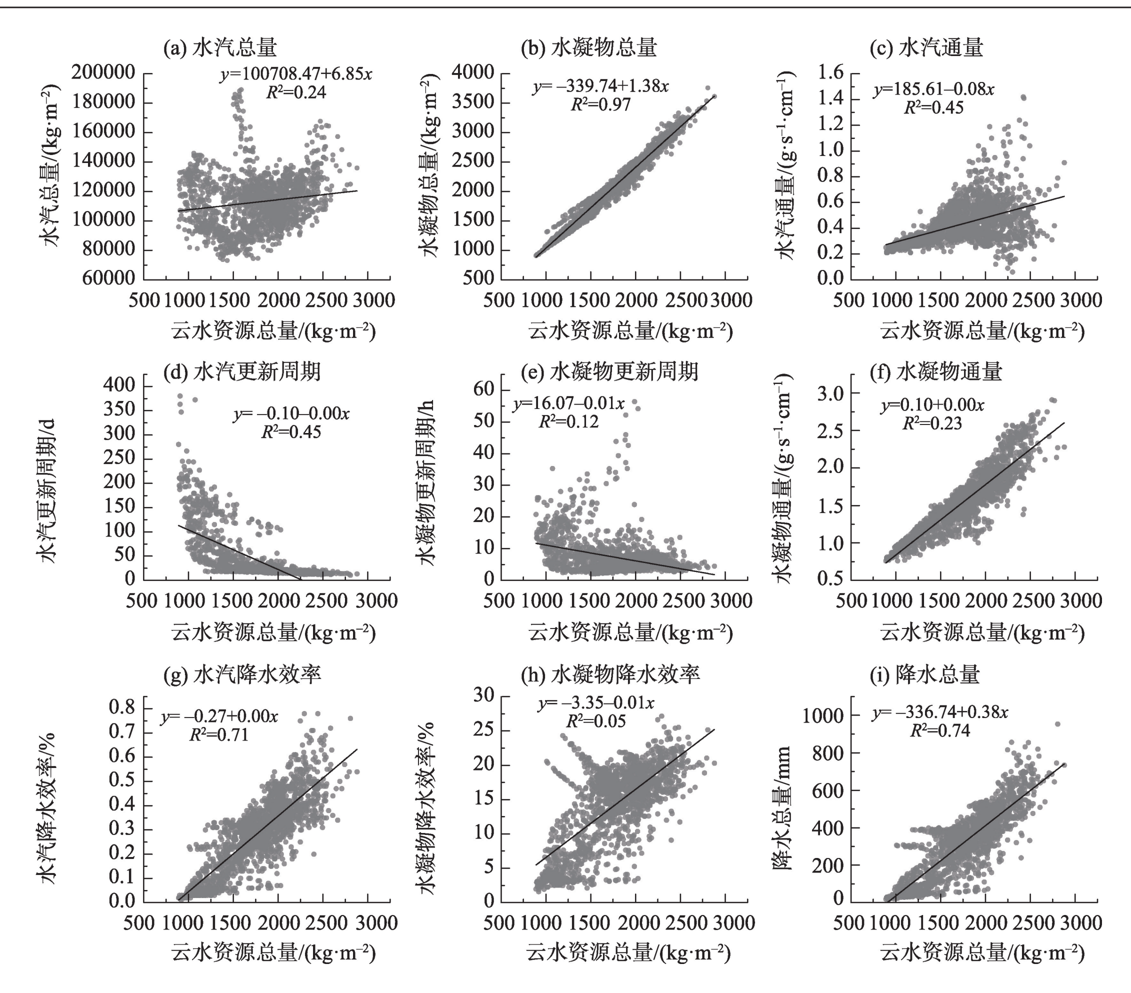


图5 2014—2018年青海省云水资源总量与相关水物质的线性关系

Fig. 5 Linear correlation between total cloud water resources and related water substances in Qinghai Province from 2014 to 2018

盆地的东南部是主要的高值分布区。除以上特征外，秋季和冬季柴达木盆地东南部、乌兰、德令哈西部、大柴旦东北部云水总量相对较高。

2.3 云水资源总量EOF分析

为揭示青海省2014—2018年云水资源的主要空间分布特征，采用EOF方法对2014—2018年各月进行分析，结果发现前两个特征向量累计方差贡献率为82%和12%，利用North检验前两个特征向量验证其可以有效分离[21]。EOF1的分布中青海省均处于正值区（图7a），表明云水资源变化的一致性，反映了全省云水主要分布特征，整体和降水量分布近似，呈现东北多西南少的阶梯式变化，祁连山南麓、三江源地区及可可西里的南部均有较高的正异常的区域，与总云水资源高值区对应。从EOF1对应的主分量PC1的时间系数上来看（图7b），全年呈现单峰型趋势，冬季最低，6月最高，在5月、6月和9月是云水资源较高时期。从EOF2的云水资源分布图可见（图7c），北部为正异常区域，其中祁连山南麓最高，而南部为负异常区域，以阿尼玛卿山西北部最明显。从对应的PC2时间系数上来看（图7d），1—3月、9—12月均有负值，4—8月均是正值，有较强的季节分布，空间分布特征说明在夏季祁连山南麓等东部、南部云水资源偏多，而除夏季以外的其他季节，三江源地区云水资源有偏少的趋势，但占比较小，由于西南气流对三江源云水资源的变化非常重要，在受偏西和西北气流控制下，到达青海南部的水汽较少，容易导致祁连山南麓等东部、南部在夏季云水资源偏多，三江源地区除夏季以外云水资源偏少的趋势分布特征。

3 结 论

利用水平分辨率0.25°×0.25°的ERA5小时再分析资料，根据CWR-MEM方法和EOF方法，对2014—2018年青海省降水、水汽、水凝物及空中云

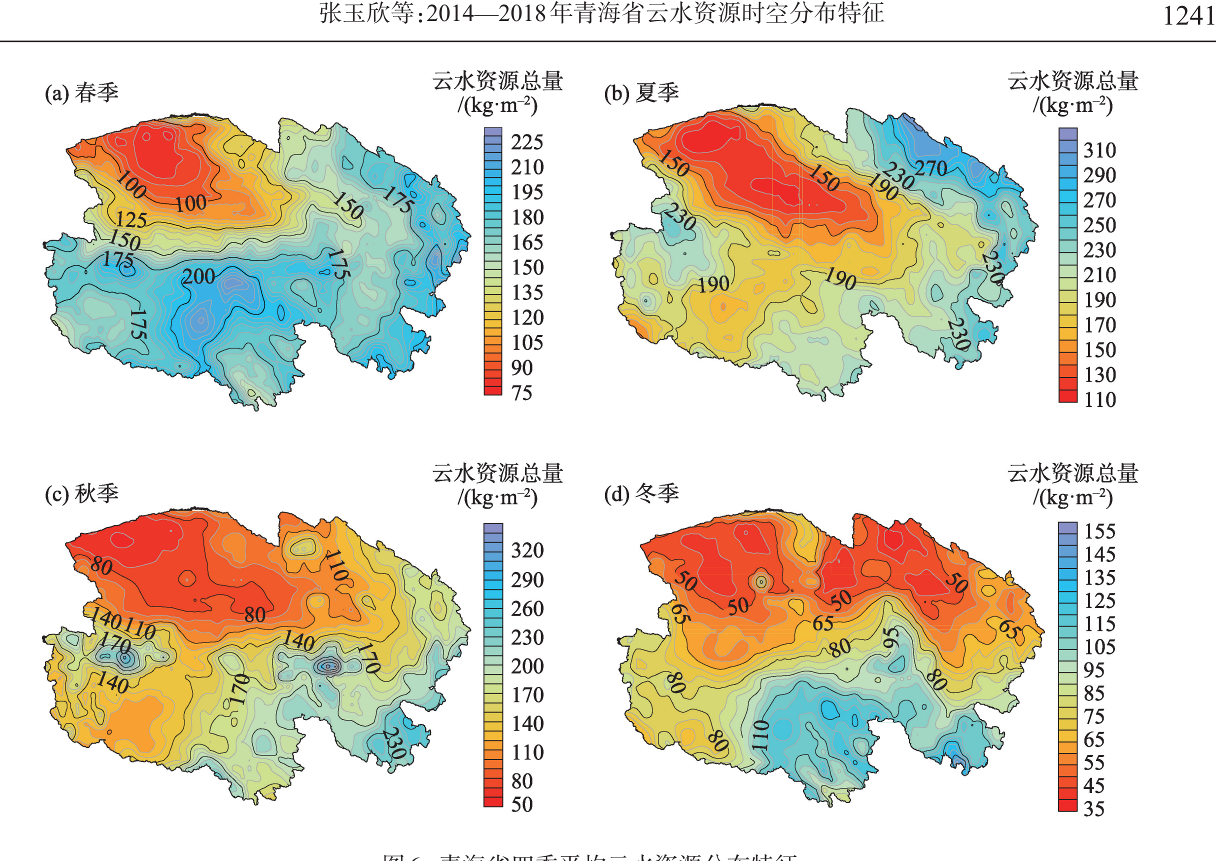


图6 青海省四季平均云水资源分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of average cloud water resources in Qinghai Province in four seasons

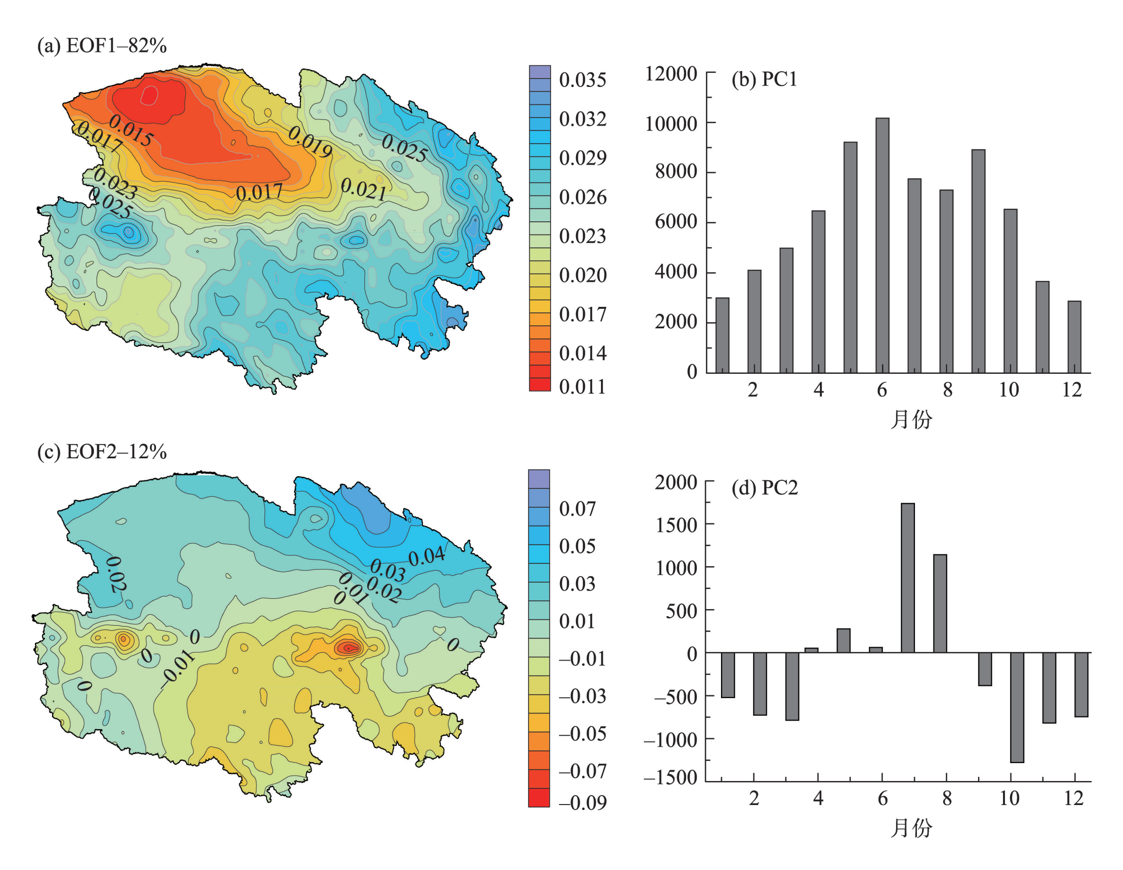


图7 2014—2018年青海省年平均云水资源分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of average cloud water resources in Qinghai Province from 2014 to 2018

水资源进行分析。主要结论如下：

（1）青海省年降水分布呈东南多、西北少阶梯性递减特征。其中，西部三江源地区、祁连山南麓降水量较高。柴达木盆地年降水量不足50 mm，青海省降水空间分布极不均匀，高原降水并不随海拔高度增大，青藏高原降水的海拔梯度效应受到复杂的地形和水汽来源的共同作用。

（2）水汽分布带主要为北部的柴达木—青海湖—河湟谷地分布带、西南部的可可西里—治多—杂多分布带和东南部的巴颜喀拉山—黄河河曲地区分布带；水凝物和降水分布特征相似，呈东南多西北少，在山脉迎风坡相对偏多，祁连山区和青海湖流域偏多的特征。全省水汽主要从南、西南和西北边界输入，输送通量达1200 $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}$，更新周期约22 d。水凝物主要从澜沧江和长江源区的西部和南部输入，祁连山区、东部农业区和黄河源区东部输出，输送通量仅30 $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}$，更新周期约5 h。全省平均水汽和水凝物降水效率分别为0.3%和14%，分布近似以西高东低分布，水汽凝结效率在柴达木盆地最低（0.2%），而长江和澜沧江源区最高（0.5%）。

（3）青海省云水资源708×10^8 t，相对丰沛，可开发潜力较大。年平均分布特征在三江源地区南部及东南部最为丰沛，最高达2000 $kg\cdot m^{-2}$，祁连山南麓至西宁延伸带的云水资源为次高区，柴达木盆地云水资源总量相对较低，仅为900 $kg\cdot m^{-2}$。夏季为云水资源最丰富的季节，祁连山地区、青海湖流域、东部农业区和三江源地区云水总量显著增加，其中，祁连山西端最高（330 $kg\cdot m^{-2}$），澜沧江和长江源区、巴颜喀拉山、黄河河曲地区6月最高（320 $kg\cdot m^{-2}$）。云水资源EOF分解中空间分布呈现东北多西南少的阶梯式变化，祁连山南麓、三江源地区及可可西里的南部均有较高的正异常的区域。

参考文献（References）：

[1] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2002. [Li Dashan. Current Situation and Prospect of Weather Modification[M]. Beijing: Science Press, 2002.]

[2] 张强. 中国西北云水资源开发利用研究[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Zhang Qiang. Research on Development and Utilization of Cloud Water Resources in Northwest China[M]. Beijing: Science Press, 2007.]

[3] 杨大生, 王普才. 中国地区夏季6—8月云水含量的垂直分布特征[J]. 大气科学, 2012, 36(1): 89-101. [Yang Dasheng, Wang Pucai. Characteristcs of vertical distributions of cloud water contents over China during summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(1): 89-101.]

[4] 李兴宇, 郭学良, 朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势[J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1094-1106. [Li Xingyu, Guo Xueliang, Zhu Jiang. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(5): 1094-1106.]

[5] Yu R, Yu Y, Zhang M. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(6): 1090-1102.

[6] 林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 309-317. [Ling Houbo, Yu Qinglong, Jiao Yang, et al. Water vapor transportation and its influences on precipitation in summer over Qinghai-Xizang plateau and its surroundings[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 309-317.]

[7] 张洁, 周天军, 宇如聪, 等. 中国春季典型降水异常及相联系的大气水汽输送[J]. 大气科学, 2009, 33(1): 121-134. [Zhang Jie, Zhou Tianjun, Yu Ruchong, et al. Atmospheric water vapor transport and corresponding typical anomalous spring rainfall Patterns in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(1): 121-134.]

[8] 赵光平, 姜兵, 王勇, 等. 西北地区东部夏季水汽输送特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 239-247. [Zhao Guangping, Jiang Bing, Wang Yong, et al. Characteristics of summer water vapor transport in the eastern Northwest China and their relationships with precipitation[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 239-247.]

[9] 马新平, 尚可政, 李佳耘, 等. 1981-2010年中国西北地区东部大气可降水量的时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 448-455. [Ma Xinping, Shang Kezheng, Li Jiayun, et al. Spatial and temporal changes of atmospheric precipitable water in the eastern part of Northwest China from 1981 to 2010[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 448-455.]

[10] 黄小燕, 王圣杰, 王小平. 1960—2015年中国西北地区大气可降水量变化特征[J]. 气象, 2018, 44(9): 1191-1199. [Huang Xiaoyan, Wang Shengjie, Wang Xiaoping. Variations of precipitable water in Northwest China during 1960-2015[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1191-1199.]

[11] 刘菊菊, 游庆龙, 王楠. 青藏高原夏季云水含量及其水汽输送年际异常分析[J]. 高原气象, 2019, 38(3): 449-459. [Liu Juju, You Qinglong, Wang Nan. Interannual anomaly of cloud water content and its connection with water vapor transport over the Qinghai-Tibetan plateau in summer[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(3): 449-459.]

[12] 王凯, 孙美平, 巩宁刚. 西北地区大气水汽含量时空分布及其输送研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 290-297. [Wang Kai, Sun Meiping, Gong Ninggang. Spatial and temporal distribution and transportation of the water vapor in the northwestern China[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 290-297.]

[13] 蔡淼. 中国空中云水资源和降水效率的评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. [Cai Miao, Cloud Water Resources and

Precipitation Efficiency Evaluation over China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.]

[14] 祁艳, 颜玉倩, 李金海, 等. 青藏高原5—10月地表潜热通量与青海同期降水之间的关系[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 529−536. [Qi Yan, Yan Yuqin, Li Jinhai, et al. Relationship between surface latent heat flux over the Qinghai-Tibetan plateau and precipitation in Qinghai from May to October[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 529−536.]

[15] 黄玉霞, 李栋梁, 王宝鉴, 等. 西北地区近40年年降水异常的时空特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 245−252. [Huang Yuxia, Li Dongliang, Wang Baojian, et al. Analyese on temporal-spatial features of annual precipitation in Northwest China in 1961−2000 [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(2): 245−252.]

[16] 张宁瑾, 肖天贵, 假拉. 1979—2016年青藏高原降水时空特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 373−382. [Zhang Ningjin, Xiao Tiangui, Jia La. Spatial and temporal characteristics of precipitation in the Tibet Plateau from 1979 to 2016[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 373−382.]

[17] 鲁春霞, 王菱, 谢高地, 等.青藏高原降水的梯度效应及其空间分布模拟[J]. 山地学报, 2007, 25(6): 655−663. [Lu Chunxia, Wang Ling, Xie Gaodi, et al. Altitude effect of precipitation and spatatial distrbution of Qinghai-Tibetan plateau[J]. Mountain Research, 2007, 25(6): 655−663.]

[18] 李生辰, 李栋梁, 赵平, 等. 青藏高原"三江源地区"雨季水汽输送特征[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 591−598. [Li Shengchen, Li Dongliang, Zhao Ping, et al. The climatic characteristics of vapor transportation in rainy season of the origin area of three rivers in Qinghai-Xizhang plateau[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67 (4): 591−598.]

[19] 张良, 王式功, 尚可政, 等. 祁连山区空中水资源研究[J]. 干旱气象, 2007, 5(1): 14−20. [Zhang Liang, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. Research on vapor and precipitation resources over the Qilian mountain area[J]. Journal of Arid Meteorology, 2007, 5(1): 14−20.]

[20] 高黎明, 张乐乐, 陈克龙. 青海湖流域湿地小气候特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 189−195. [Gao Liming, Zhang Lele, Cheng Kelong. Microclimate in an alpine wetland in the Qinghai lake basin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 189−195.]

[21] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(7): 699−706.

Analysis of spatial and temporal distribution characteristics of cloud water resources in Qinghai Province from 2014 to 2018

ZHANG Yuxin, MA Xueqian, HAN Huibang, ZHANG Pengliang, LIU Na

(Qinghai Weather Modification Office, Xining 810000, Qinghai, China)

Abstract: Based on the ERA5-hour reanalysis data (with a horizontal resolution of 0.25×0.25), the precipitation, water vapor, hydrocoagulation, and aerial cloud water resources of Qinghai Province were analyzed from 2014 to 2018, using the CCR-MEM and EOF methods. The results showed that the annual precipitation distribution in Qinghai Province was characterized by a greater decline in the southeast and a more limited decline in the northwest, and the spatial distribution was extremely uneven. The water vapor distribution zones were mainly the Qaidam (Qinghai Lake) and Hehuang Valley in the north, the Hoh Xil (Zhiduo) heterotopia distribution zone in the southwest and the Bayan Kera Mountain-Yellow River bend area in the southeast. The distribution characteristics of hydrocoagulants and precipitation were more similar in the southeast than in the northwest, and more in the windward slope of the mountain range.The average precipitation efficiency of water vapor and water condensate was 0.3% and 14%, respectively. The total cloud water resources measured 70.8 billion tons, and were most abundant in the south and southeast of Sanjiangyuan area. The cloud water resources from the southern foot of Qilian Mountain to the extension zone of Xining were the second highest in this area In the decomposition of the EOF method, the main spatial distribution of cloud water resources showed a step-like change in the northeast and southwest. It is urgent to carry out targeted weather modification operations, based on the transport of water vapor and hydrocoagulants and on the distribution characteristics of cloud water resources, combining different regions and different landforms.

Keywords: cloud water resources; moisture transport; precipitation efficiency; EOF analysis